**5089**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

# СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 4

## РЕЗИСТИВНЫЕ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОДАТЧИКИ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 4 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы резистивных и гальванических термодатчиков, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

*Активный полупроводниковый датчик, резистивный температурный датчик, термопара*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А.Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы**

Ознакомление с основными классами и принципами работы датчиков температуры, изучение работы термисторных, термопарных и на основе p-n-перехода датчиков температуры; их простая косвенная градуировка.

## 1. Краткие теоретические сведения

### *Резистивные температурные датчики*

В общем случае на резистивный преобразователь влияют различные по физической природе величины: электрические, магнитные, механические, тепловые и т.д. Одним из наиболее существенно влияющих факторов является температура. Для чистых металлов и большинства сплавов сопротивление повышается с ростом температуры и приблизительно определяется формулой:

$$R_2 = R_1(1+\alpha(T_2 - T_1)), \qquad (1)$$

где $R_2$ и $R_1$ - сопротивления при температурах $T_2$ и $T_1$, $\alpha$ - температурный коэффициент сопротивления (ТКС), составляющий для большинства металлов 0,004 $К^{-1}$.

Удельное сопротивление полупроводников с ростом температуры падает, зависимость сопротивления от температуры нелинейная, но в диапазоне температур 10 – 30 $^0$C

можно приближенно считать ТКС равным 0,03 $К^{-1}$ . Для уменьшения температурных погрешностей применяются термостирование и температурная коррекция. В полупроводниковых резисторах при температурах, близких к комнатной, кроме того, меняется концентрация носителей заряда. Это происходит в основном за счет собственных носителей, в связи с чем для увеличения относительного изменения концентрации с изменением температуры необходимо использовать полупроводники с проводимостью, близкой к собственной. Электропроводность собственного полупроводника:

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p), \qquad (2)$$

где

$$n_i = \sqrt{(N_c \cdot N_v)}\exp(-\Delta E/2kT). \qquad (3)$$

Пренебрегая более слабыми зависимостями от температуры, нежели экспоненциальные, можно записать выражение для сопротивления полупроводника:

$$R = R_0 \exp(\Delta E/2kT) \qquad (4)$$

или

$$R = R_0 \exp\left[ \frac{\Delta E}{2k} \frac{T_0 - T}{T_0 T} \right], \qquad (5)$$

где $R_0$ – сопротивление при Т=293 К.

Выражая из (5) температуру, получаем:

$$T = T_0 \left[ 1 + \frac{2kT_0}{\Delta E} \cdot \ln\left( \frac{R}{R_0} \right) \right]^{-1}. \qquad (6)$$

Термистор характеризуется следующими параметрами:

– температурный коэффициент сопротивления $\alpha_T$, %/°С

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = -\frac{\Delta E}{2kT^2} \cdot 100; \qquad (7)$$

– максимально допустимая мощность рассеяния $P_{max}$ и максимально допустимая температура $T_{max}$, при которых не происходят необратимые изменения характеристик термистора;

– коэффициент рассеяния $H$, численно равный мощности, отводимой от термистора в окружающую среду при разности температур поверхности термистора и окружающей среды 1 град;

– постоянная времени $\tau$, равная времени, за которое превышение температуры рабочего тела термистора над окружающей средой при охлаждении его в спокойном воздухе уменьшается в 2,7 раза.

При малых напряжениях соблюдается закон Ома, и в этом режиме термистор используется в качестве датчика температуры, а также в схемах температурной компенсации. Как всякий прибор с ВАХ S-типа (рис. 1), термистор может использоваться в схемах переключателей – это второй режим работы термистора.

Изготавливаются термисторы из поликристаллических полупроводников с большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Чаще всего это окислы металлов переходного ряда периодической системы элементов или их смеси.

### *Активные полупроводниковые датчики*

В качестве датчика температуры применяют также полупроводниковый диод. Термочувствительным параметром в этом случае может быть зависимость обратного тока *p*-*n*-перехода, падения напряжения на прямосмещенном *p*-*n*-переходе и его сопротивления от температуры. На рис. 2 показаны прямые ВАХ *p*-*n*-перехода при различных температурах.

Статическое сопротивление диода, как и для монокристаллического терморезистора, можно записать в виде:

$$R = R_0 \exp(\Delta E / kT), \qquad (8)$$

но в данном случае $\Delta E/kT$ в 2 раза больше, чем для терморезистора.

На практике для расчета зависимости $I_{нас}(T)$ удобно пользоваться формулой:

$$I_o = I_o \exp\left[\frac{\Delta E}{kT}\frac{T - T_0}{T_0}\right], \qquad (9)$$

где *Io* – экспериментально измеряемый обратный ток при $T_0$; T=293 К.

Преимуществом диодных датчиков являются высокая чувствительность и малый потребляемый ток. Германиевые диоды используются для измерения температур не выше 90-100 $^0$C, а кремниевые – до 150-170 $^0$C. Для измерения более высоких температур можно применять диоды из арсенида галлия.

При выборе в качестве термочувствительного параметра обратного тока диода чувствительность максимальна, однако характеристика нелинейная. Для получения линейной зависимости напряжения с датчика температуры используется зависимость прямого напряжения на p-n-переходе от температуры:

$$U_F \approx \frac{kT}{q}. \qquad (10)$$

На практике в качестве термочувствительного диода часто используется эмиттерный переход биполярного транзистора с коллектором, замкнутым с базой.

Кроме рассмотренных, применяют также и другие приборы в качестве термодатчиков: среди них S-диоды, тиристоры, полевые и однопереходные транзисторы.

### *Термопары*

Широкое распространение получила идея использовать для измерения температуры термоэлектрический эффект, или эффект Зеебека, который заключается в следующем. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников) A и B, соединив их между собой концами (рис. 3, а), причем температуру $T_1$ одного места соединения сделать отличной от температуры $T_0$ другого, то в цепи потечет ток под действием ЭДС, называемой термоэлектродвижущей силой (термо-ЭДС) и представляющей собой разность функций температур мест соединения проводников:

$$E_{AB}(T_1, T_0) = f(T_1) - f(T_0). \qquad (11)$$

Подобная цепь называется термоэлектрическим преобразователем или термопарой; проводники, составляющее термопару, - термоэлектродами, а места их соединения - спаями.

Термо-ЭДС при небольшом перепаде температур между спаями $E_{AB}$ можно считать пропорциональной разности температур:

$$\mathbf{E}_{AB} = \boldsymbol{S}_{AB}\Delta\mathbf{T} \qquad (12)$$

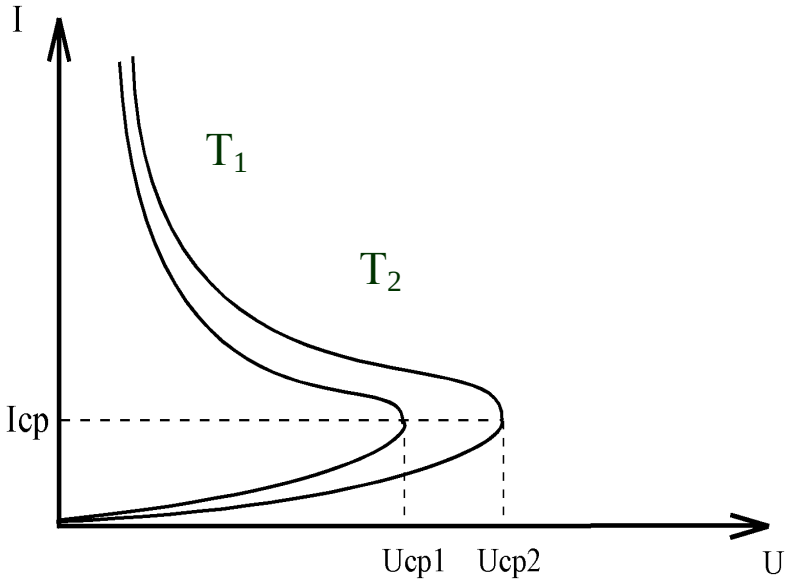



Рис. 1. ВАХ термистора при различных значениях температуры ($T_2$>$T_1$)

Опыт показывает, что у любой пары однородных проводников значение термо-ЭДС зависит только от природы проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температур вдоль проводников. Термоэлектрический контур разомкнуть можно в любом месте и включить в него один или несколько разнородных проводников (рис.3, б, в). Если все появившиеся при этом места соединений находятся при одинаковой температуре, то не возникает никаких паразитных ЭДС (закон последовательности металлов).

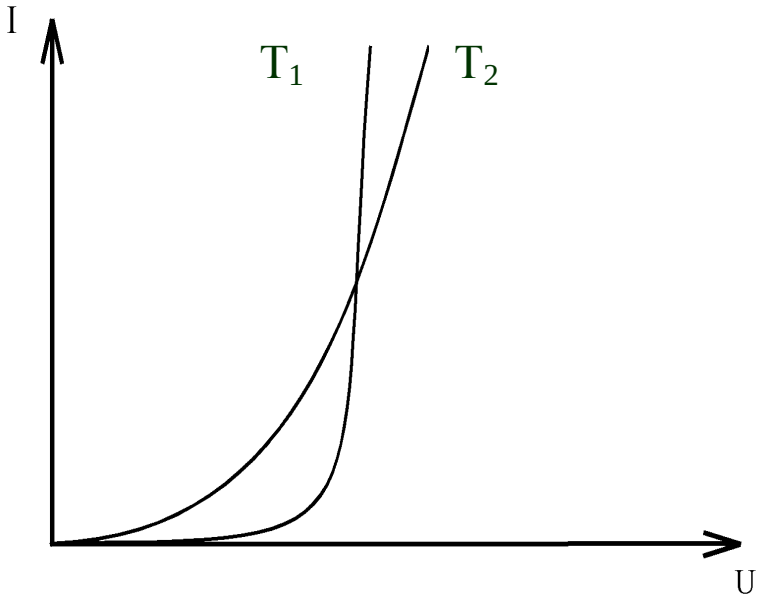
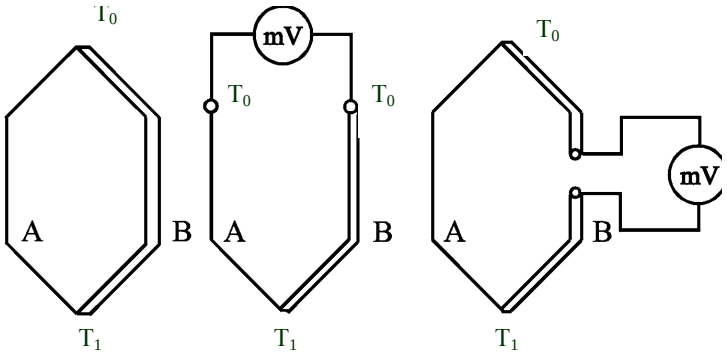



Рис. 2. Зависимость прямой ВАХ p-n-перехода от температуры ($T_2$>T)




а б в

Рис. 3. Термопара: а – замкнутый контур из различных проводников (полупроводников) А и В; б - разомкнутый контур с одной парой разнородных проводников; в – двумя парами проводников

## 2. Описание лабораторной установки

В работе используются четыре термочувствительных элемента: ртутный термометр, терморезистор (марки ММТ-4, $R_{To}$=1кОм), термопара “хромель-копель“, полупроводниковый диод, которые помещены в печку. $R_0$=500 Ом - прецизионный резистор, падение напряжения на котором пропорционально протекающему в цепи току. Это падение напряжения, а также термо-ЭДС термопары контролируются универсальным цифровым вольтметром В7-21. Напряжение на диод и терморезистор подается от источника питания ВИП-009. Термопара подключается к основному вольтметру В7-21, диод и

терморезистор через соединительный блок – к блоку измерения токов и напряжений этого же вольтметра (рис. 4).

Выбор текущего датчика (терморезистор или диод) осуществляется переключателем $П_1$.

## 3. Порядок выполнения работы

3.1. Произвести коммутацию схемы.

3.2. Включить источник питания и вольтметр.

3.3. Снять ВАХ термистора при $T$=20 $^0$C. Определить $R_T$ при 20 $^0$C.

3.4. Определить $I_o$ диода по той же схеме.

3.5. Установить $U_{ПR}$=10 В; $U_{ПД}$=10 В.

3.6. Включить печь. Снять зависимости $R(T)$, $I_o(T)$, $E(T)$, $I_R$ для термистора, диода и термопары соответственно. Температура определяется по прецизионному ртутному термометру.

3.7. Выключить печь, вольтметр, источник питания.

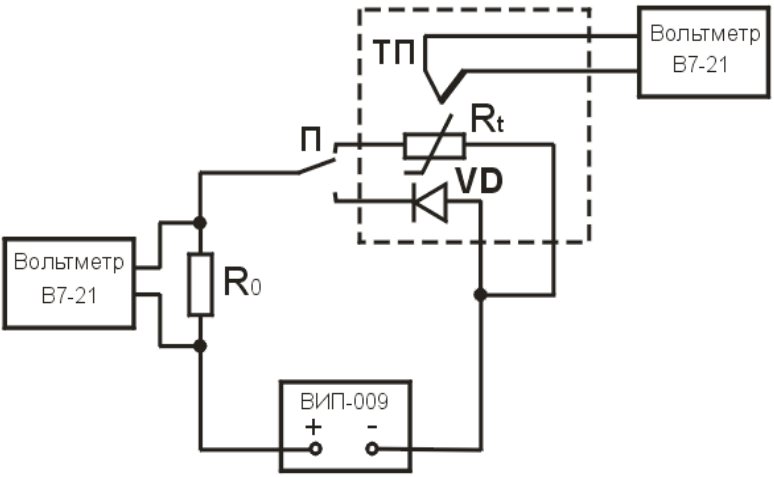
## 4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Экспериментальные таблицы, градуировочные зависимости.

4.3. Расчет чувствительности, коэффициента нелинейности.

4.4. Выводы.




$R_0$ – образцовый резистор,

ТП – термопара,
$R_t$ – терморезистор,
VD – диод (датчик температуры).

Рис. 4. Функциональная схема лабораторной установки

**Контрольные вопросы**

1. Термоэлектрический эффект: эффект Томсона, Пельтье, Зеебека.

2. Термогальванические законы: закон последовательности температур, промежуточных металлов, закон Вольта и правило Магнуса.

3. Температура опорного спая. Методы компенсации температуры рабочего спая.

4. Металлические и полупроводниковые термометры. Линейность и термочувствительность. Конструктивное исполнение.

5. Термисторы с отрицательным и положительным ТКС.

6. Сравнительная характеристика гальванических и терморезистивных датчиков.

**Библиографический список**

1. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики. Л.: Энергия, 1965. 240 с.

2. Фогельсон И.Б. Транзисторные термодатчики. М.: Сов.Радио, 1972. 122 с.

3. Линевич Ф. Измерение температуры в технике: справочник. М.: Металлургия, 1980. 549 с.

4. Викулин И.М, Стафеев В.И Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., пререраб. и доп. М.: Радио и связь. 1990. 224 с.

5086

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 1

## ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ДАТЧИКИ ХОЛЛА

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 1 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о эффекте Холла, магниторезистивном и магнитодиодном эффектах, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 7. Библиогр.: 8 назв.

*Эффект Холла, магниторезистивный эффект, датчик Холла, магнитодиодный эффект*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы**

Изучение эффекта Холла и других гальваномагнитных и магниторезистивных эффектов; исследование зависимости ЭДС Холла от индукции магнитного поля соленоида.

## 1. Краткие теоретические сведения

***Эффект Холла***

Эффект Холла заключается в возникновении поперечной разности потенциалов в полупроводнике, по которому проходит электрический ток, в том случае, когда есть магнитное поле, перпендикулярное к направлению тока. Рассмотрим этот эффект подробнее.

Предположим, что в пластине полупроводника, находящейся в магнитном поле, идет ток, обусловленный движением только электронов (рис.1).

Пренебрежем пока статическим разбросом электронов по скоростям. Тогда сила Лоренца будет смещать электроны к нижней грани пластины полупроводника. Направление смещения определяется направлением силы Лоренца, то есть векторным произведением:

$$\vec{F}_{o} = q\left[\vec{V} \times \vec{B}\right], \qquad (1)$$

где $q$ - элементарный заряд, $\vec{V}$ - скорость носителя заряда, $\vec{B}$ - индукция магнитного поля.

В результате смещения движущихся электронов между верхней и нижней гранями пластины полупроводника возникает ЭДС Холла.

В полупроводнике *p*-типа при аналогичном направлении векторов *B* и *I* знак ЭДС Холла меняется на противоположный.

Накопление носителей заряда у нижней грани пластины полупроводника прекращается, когда сила Лоренца уравновесится силой электрического поля Холла. При перпендикулярном направлении напряженности магнитного поля к поверхности пластинки полупроводника условием такого динамического равновесия будет равенство:

$$qVB = qE_{H}, \qquad (2)$$

где $E_H$ – напряженность поля Холла.

Считая электрическое поле Холла однородным и учитывая геометрические размеры пластинки полупроводника, записываем уравнение для ЭДС Холла, то есть для поперечной разности потенциалов между боковыми гранями пластинки полупроводника с электропроводностью *p*-типа:

$$U_H = E_H a = VB, \quad (3)$$

где $a$ – расстояние между контактами Холла.

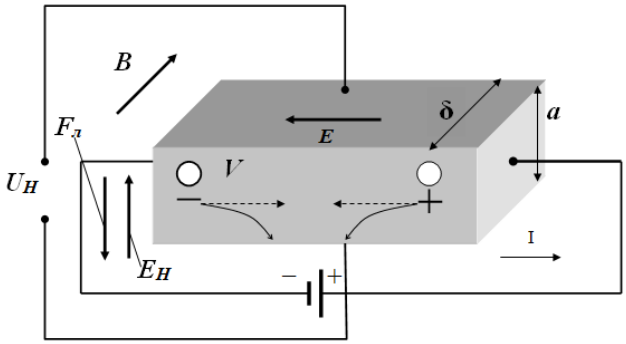



Рис. 1. Эффект Холла в кристаллическом полупроводнике

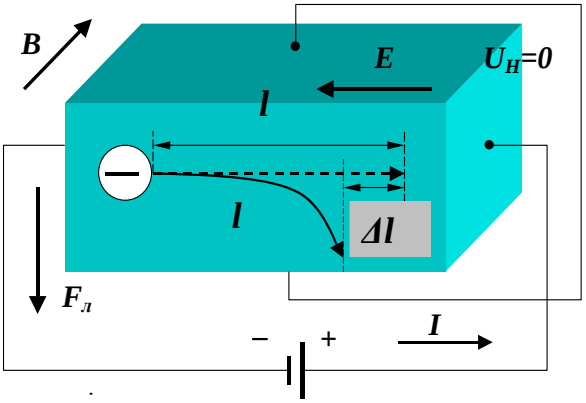



Рис. 2. Эффект магнитосопротивления

Значение скорости дырок определим из формулы для тока:

$$I = JS = qp\mu_\partial ES = qpVa\delta, \quad (4)$$

где $S$ – площадь поперечного сечения полупроводника, $\delta$ – толщина пленки (слоя) полупроводника, $p$ – концентрация основных носителей заряда (дырок) в полупроводнике, $\mu_\partial$ – дрейфовая подвижность носителей заряда (дырок).

Тогда

$$U_{\text{Н}} = \frac{1}{qp}\frac{IB}{\delta} = R_{\text{Н}}\frac{IB}{\delta}, \qquad (5)$$

где $R_{\text{Н}} = \frac{1}{qn}$ – коэффициент Холла для полупроводника с электропроводностью *n*-типа.

В действительности носители заряда в полупроводнике распределены по скоростям. Поэтому более точное значение коэффициента Холла отличается от полученного ранее выражения коэффициентом А:

$$R_{\text{Н}} = \frac{\text{A}}{qp}. \qquad (6)$$

Значение коэффициента А находится в диапазоне от 1 до 2 и зависит от механизма рассеяния носителей заряда. Так, для вырожденного полупроводника А = 1, для полупроводника с преобладающим рассеянием носителей на тепловых колебаниях кристаллической решетки А = 1,18, для полупроводника с преобладающим рассеянием на ионизированных примесях А= 1,93. Коэффициент Холла для полупроводника с электропроводностью *n*-типа имеет другой знак:

$$R_{\text{Н}} = -\frac{\text{A}}{qn}. \qquad (7)$$

В полупроводниках с приблизительно равными концентрациями электронов и дырок (например, в собственных полупроводниках) расчет коэффициента Холла получается более сложным:

$$R_{\text{Н}} = -\frac{\text{A}}{q}\frac{n\mu_n^2 - p\mu_P^2}{(n\mu_n + p\mu_P)^2}, \qquad (8)$$

где $\mu_n$, $\mu_p$ – дрейфовая подвижность электронов и дырок соответственно.

Из формулы (5) видно, что для повышения $U_H$ необходимо уменьшать толщину образца $\delta$, что в пределе приводит к пленочной конструкции датчика Холла (рис. 3, а).

***Магниторезистивный эффект***

В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, при прохождении электрического тока на носители заряда действует сила Лоренца, искривляющая их траекторию движения (рис. 2). Поэтому эффективная длина пробега носителей в направлении электрического

поля уменьшается на $\Delta\ell$, что проявляется в эффективном увеличении удельного сопротивления полупроводника:

$$\Delta\ell = \ell - \ell\cos\varphi, \qquad (9)$$

где $\ell$ – длина пробега носителей, $\cos\varphi$ – косинус угла Холла.

Угол $\varphi \approx \mu_{n(p)}B$. Функцию $\cos\varphi$ можно разложить в ряд Тейлора и, ограничившись первыми двумя членами ряда, получить:

$$\frac{\Delta\ell}{\ell} \approx \frac{\mu^2 B^2}{2} \approx \frac{\Delta\rho}{\rho}. \qquad (10)$$

Изменение удельного сопротивления или проводимости полупроводника в магнитном поле называется *эффектом Гаусса* или *магниторезистивным эффектом* (эффектом магнитосопротивления). В полупроводнике n-или p-типа проводимости отклонение носителей к одной из граней полупроводника приводит к возникновению поперечного электрического поля – поля Холла. Напряженность этого поля такова, что при параллельности граней образца и линий тока происходит полная компенсация действия силы Лоренца. Эти процессы протекают за очень короткий промежуток времени ($10^{-12}$ с), и поэтому эффекта магнитосопротивления наблюдаться не должно было бы. Однако скорости частиц имеют дисперсионное размытие для пакета носителей, поэтому поле Холла компенсирует действие силы Лоренца только для носителей, движущихся со средней скоростью. На более медленные носители поле Холла действует сильнее, а на более быстрые преобладающее влияние оказывает сила Лоренца [формулы (3), (5)]. Поэтому вклад в проводимость носителей, движущихся со скоростью, отличной от средней в поперечном магнитном поле, оказывается меньше. Для собственного (нелегированного) полупроводника эффект магнитосопротивления выражен значительно сильнее, так как. ЭДС Холла имеет очень малое значение. Исключить влияние ЭДС Холла в легированном полупроводнике можно, если на поверхность пластинки нанести узкие металлические полоски для «закорачивания» холловской разности потенциалов (рис. 3, б). Они должны располагаться перпендикулярно к линиям тока и вектору индукции магнитного поля. Вместо нанесенных на поверхность полосок могут использоваться монокристаллы с пронизывающими их металлическими иглами.

Такой вариант используется при создании магниторезисторов из сплава InSb+NiSb. При выращивании монокристаллов из этого материала NiSb образует иглы высокой проводимости, которые при выборе соответствующей ориентации практически полностью исключают поле Холла. Исключить ЭДС Холла для повышения чувствительности магниторезистора можно с помощью специальных

конструкций, например так называемого диска Корбино (рис. 3, в). В данном случае датчик представляет собой пластину полупроводника в форме диска с концентрическим расположением контактов: один в центре на оси диска, а другой по окружности на равных расстояниях от первого. В этом случае линии тока будут расположены радиально. При помещении в магнитное поле, пронизывающее пластину перпендикулярно, носители будут отклоняться вдоль поверхности. Линии тока удлиняются, но накопления холловских зарядов происходить не будет. В такой структуре наблюдается максимальный эффект магнитосопротивления [4].

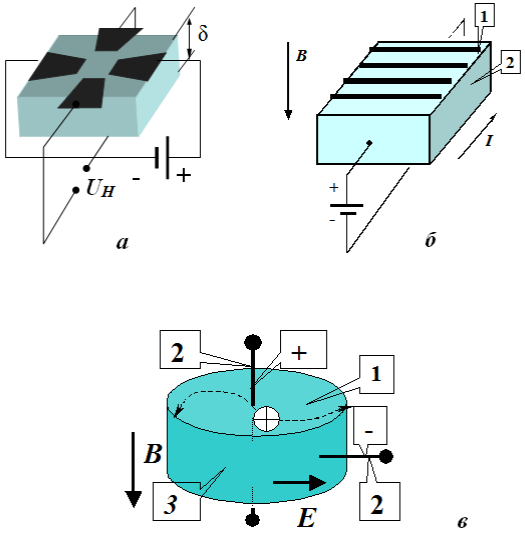



Рис. 3. Конструкции гальваномагнитных и магниторезистивных датчиков: а – пленочный датчик Холла ($\delta$ – толщина пленки полупроводника); б – пленочный магниторезистор с закорачивающими контакты Холла перемычками (1 - металлические пленочные перемычки, 2 – холловские контакты); в – диск Корбино (1 - диск полупроводника, 2 – выводы осевого и концентрического электродов, 3 – концентрический электрод)

В настоящее время для создания магниторезисторов наиболее широко используется антимонид индия InSb с металлическими закорачивающими полосками. Поскольку эффект магнитосопротивления тем больше, чем выше подвижность носителей, то для создания магниторезисторов наиболее перспективно

использование полупроводниковых материалов с узкой запрещенной зоной или бесщелевых составов. В последнее время предложено использовать твердый раствор теллуридов кадмия и ртути $(HgTe)_{1-x}+CdTe_x$. Состав раствора выбирается в зависимости от требуемой рабочей температуры. Магниточувствительность данного раствора независимо от рабочей температуры значительно выше, чем у InSb, однако сопротивление образца без магнитного поля оказывается значительно меньше, что усложняет их практическое использование. Для повышения начального сопротивления магниторезисторы изготавливаются в виде змейки. При малых магнитных полях зависимость сопротивления от индукции магнитного поля носит параболический характер, а при больших – становится линейной.

***Магнитодиодный эффект***

Магнитодиодный эффект заключается в относительно резком возрастании сопротивления полупроводникового диода в прямом направлении под воздействием поперечного магнитного поля. Рост сопротивления такого диода вызван уменьшением подвижности носителей заряда, приводящим к росту сопротивления базы [5, 6].

Одним из видов преобразователей магнитного поля, работающих благодаря магнитодиодному эффекту, являются *магнитодиоды (МД)*.

Конструктивно магнитодиод состоит из *p*-*n*–перехода с невыпрямляющими контактами, между которыми находится область высокоомного полупроводника (рис. 4, а). От обычных полупроводниковых диодов магнитодиод отличается тем, что изготавливается из высокоомного полупроводникового материала с проводимостью близкой к собственной, а шириной базы $d$ в несколько раз большей диффузионной длины пробега носителей заряда $L$, в то время как в обычных диодах $d < L$.

При прохождении электрического тока в таких «длинных» диодах определяющими становятся процессы, зависящие от рекомбинации и движения неравновесных носителей заряда в базе и на поверхности. Проводимость магнитодиода в прямом смещении напряжения при высоких уровнях инжекции определяется инжектированными в базу неравновесными носителями заряда. Падение напряжения происходит на высокоомной базе, а не на p-n-переходе как в обычном диоде. Если пропустить через магнитодиод электрический ток и поместить в поперечное магнитное поле, то сопротивление базы возрастет. Также сопротивление базы увеличивается за счет повышения роли поверхностной рекомбинации отклоняющихся к поверхности полупроводника носителей заряда [7]. Эквивалентная схема

магнитодиода представляет собой магниторезистор с последовательно включенным усилителем (рис. 4, в). Стандартная вольт-амперная характеристика «торцевого» магнитодиода приведена на рис. 4, б.

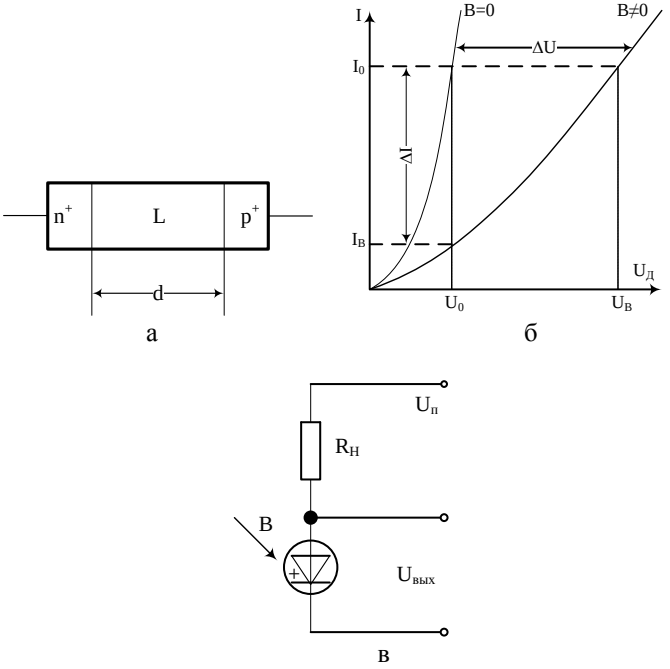



Рис. 4. К пояснению принципа действия магнитодиода: а – конструкция перехода; б – вольт – амперная характеристика; в – схема включения

Германий (Ge) и кремний (Si) являются основными материалами для изготовления магнитодиодов. Сейчас существует много разновидностей магнитодиодов, производимых по различным технологиям и в разных конструктивных формах. При изготовлении магнитодиодов применяется сплавная, биполярная, МОП и другие различные технологии. Конструктивно магнитодиоды и обычные диоды во многом схожи. Принципиальная разница заключается в том, что корпус магнитодиодов выполняется из немагнитного материала.

*Магниточувствительные транзисторы* среди широкого разнообразия полупроводниковых преобразователей магнитного поля

зарекомендовали себя как наиболее перспективные приборы, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Магнитотранзисторы (МТ) - это транзисторы, у которых конструктивные и рабочие параметры оптимизированы таким образом, что достигается максимальная чувствительность коллекторного тока при изменении магнитного поля. По направлению протекания рабочего тока относительно технологической поверхности кристалла магнитотранзисторы подразделяются на две группы: вертикальные (ток протекает параллельно) и горизонтальные (ток протекает перпендикулярно). Вертикальные магнитотранзисторы (ВМТ) способны реагировать лишь на лежащую в плоскости кристалла (продольную) компоненту магнитного поля, а горизонтальные (ГМТ) – также и на перпендикулярную к этой плоскости поперечную компоненту. В зависимости от того, к перпендикулярной или параллельной составляющей (относительно технологической поверхности) магнитного поля чувствительны магнитотранзисторы, они делятся соответственно на поперечные и продольные. В зависимости от природы переноса неосновных носителей заряда в базе, магнитотранзисторы, в свою очередь, делятся на диффузионные и дрейфовые.

Основное предназначение магнитотранзисторов – это применение их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей.

Рассмотрим на примере *полярный магнитотранзистор, у которого* знак изменения выходного тока зависит от направления магнитного поля [8]. На рис. 5 представлены конструкция и вольт-амперная характеристика полярного магнитотранзистора. Устройство сконструировано на основе магнитодиода КД304 и имеет $n\text{-}p\text{-}n^+$ структуру. Коллектор (К) и база (Б) равнозначны по выполняемой функции (инжекторы дырок в диодных прямосмещенных структурах Б-Э и К-Э, электрически соединенных с общим эмиттером (Э)).

Без магнитного поля при росте базового тока $I_б$ напряжение $U_{К\text{-}Э}$ уменьшается из-за введения в область базы между К и Э из базового контакта дополнительных носителей заряда. При воздействии управляющего магнитного поля и при нулевом токе базы $I_б = 0$ наблюдается рост напряжения, обусловленный магнитодиодным эффектом. При этом в направлении $B^+$ падение напряжения больше, чем в направлении $B^-$. Это связано с магнитодиодным эффектом и наличием захвата дырок обедненной областью у контакта металл–полупроводник.

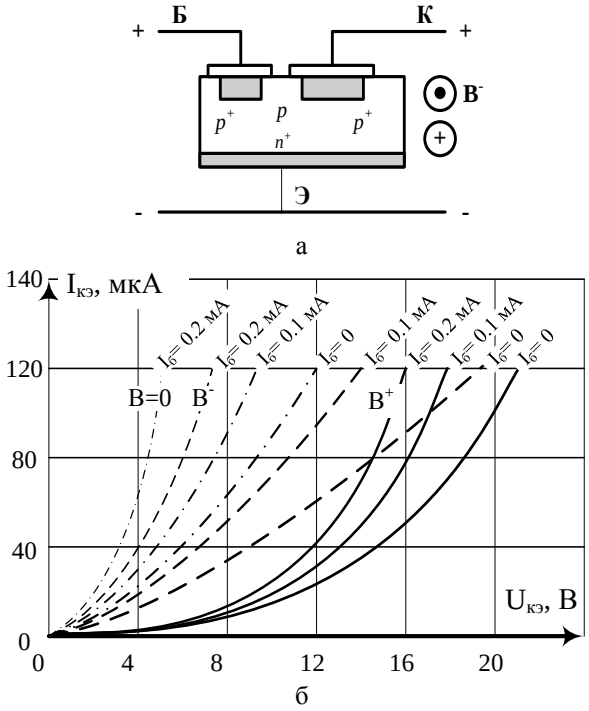



Рис. 5. Полярный магнитотранзистор: а – конструкция; б – ВАХ при изменении значений базового тока и магнитной индукции: B = 0; $B^+$ = 0,2 Тл; $B^-$ = 0,2 Тл

На рис. 6 показана зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля. В магнитном поле с $B^-$ при $I_б \neq 0$ отклоняющиеся носители зарядов обогащают базовую область с между Э и К носителями заряда и таким образом уменьшают сопротивление этой области. При этом сопротивление оказывается значительно меньше, чем при нулевом токе базы $I_б = 0$.

При значениях тока базы, не равных нулю $I_б \neq 0$, напряжение $U_{К-Э}$ уменьшается, появляется полярная магниточувствительность, которая с ростом тока $I_б$ вначале возрастает, а затем достигает насыщения. Таким образом, полярная магниточувствительность управляется током базы $I_б$. С ростом индукции управляющего магнитного поля чувствительность в поле $B^+$ возрастает линейно, а в поле $B^-$ она меньше и с увеличением индукции стремится к насыщению.

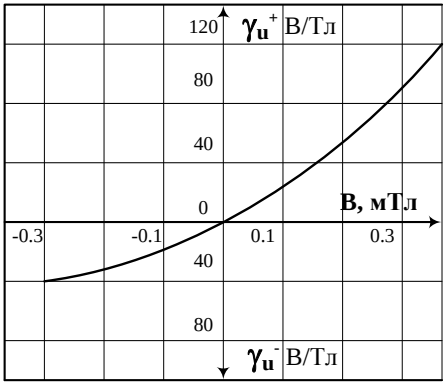



Рис. 6. Зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля при $I_б$= 0,2 мА и $I_{К\text{-}Э}$= 120 мкА

## 2. Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используются (см. рис. 7):

1 – соленоид с С–образным сердечником,

2 – полупроводниковый датчик Холла,

3 – усилительный каскад на операционных усилителях,

4 – блок питания соленоида,

5 – генератор тока,

6 – цифровой вольтметр.

Соленоид имеет длину 0,025 м и состоит из 6300 витков. Отсюда удельная плотность намотки:

$$n = \frac{6300}{0{,}025} = 252000 \cdot \qquad (11)$$

Датчик Холла крепится в зазоре этого соленоида. Таким образом, линии магнитной индукции, сосредоточенные в сердечнике, проходят через датчик Холла перпендикулярно к его плоскости и можно приблизительно считать, что индукция магнитного поля в зазоре равна индукции на оси соленоида.

Сердечник имеет магнитную проницаемость $\mu$=5000, магнитную постоянную $\mu_0$=1,26·10$^{-6}$ [Гн /м].

Считая соленоид бесконечным, можно записать для продольного вектора индукции:

$$B_Z = \mu\mu_0 I_C n = \mu\mu_0 \frac{U_{BX}}{R} n, \qquad \ldots \qquad (12)$$

где $U_{вх}$ – напряжение, прикладываемое к обмотке соленоида, $R$=6,6 кОм – активное сопротивление обмотки соленоида, $I_C$ – ток через соленоид, $n$=252000 – удельная плотность намотки.

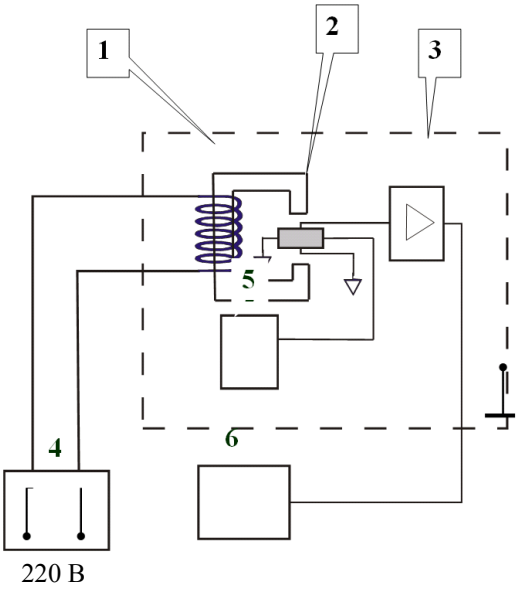



Рис. 7. Структурная схема лабораторной установки для исследования датчиков магнитного поля: 1 – соленоид; 2 – датчик Холла (магниторезистор); 3 – усилительный каскад; 4 – блок питания соленоида; 5 – генератор тока для датчика магнитного поля; 6 – цифровой вольтметр

### 3. Порядок выполнения работы

При отсутствии магнитного поля ЭДС Холла равно нулю. Однако вследствие различных побочных явлений (например, недостаточно точная установка нуля на выходе операционного усилителя) измерительный прибор может показать некоторую разность потенциалов даже при отсутствии тока в соленоиде. Для исключения этой ошибки измерения необходимо проводить дважды при двух противоположных направлениях тока в соленоиде. Тогда

$$\varepsilon_H = \frac{1}{2}\left(|\varepsilon_{H1}| + |\varepsilon_{H2}|\right). \qquad (13)$$

3.1. Установить с помощью источника питания на входе соленоида U= 10 В и измерить ЭДС Холла. Данные занести в таблицу.

Таблица экспериментальных результатов

| № п/п | U, В | B, Тл | $\varepsilon_{НИЗМ}$, мВ | $\varepsilon_{НИСТ}$, мВ | $R_{н,}$ $\frac{В \cdot м}{Тл \cdot А}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |

3.2. Увеличивая напряжение на входе соленоида через несколько вольт до максимального (50 В), провести измерения и занести соответствующие данные в таблицу.

3.3. Вычислить индукцию магнитного поля В для заданных значений $U_{вх}$ по формуле (3). Занести их в таблицу.

3.4. Вычислить истинное значение ЭДС Холла:

$$\varepsilon_{НИСТ} = \frac{\varepsilon_{НИЗМ}}{K_U}, \qquad (14)$$

где $\mathbf{K}_U$ – коэффициент усиления усилительного каскада ($\mathbf{K}_U$ = 830).

Полученные значения $\varepsilon_{НИСТ}$ занести в таблицу.

3.5. Вычислить постоянную Холла $R_Н$ для каждого измерения:

$$R_Н = \frac{\varepsilon_{НИСТ}\delta}{BI_Н}, \qquad (15)$$

где $\delta$ – толщина пленки датчика Холла ($\delta$ = 2 мкм), $I_Н$ – ток, проходящий через датчик Холла ($I_Н$=2,5мА).

Полученные значения R занести в таблицу.

3.6. По табличным данным построить графики зависимостей: $B=f(I_С)$, $\varepsilon_{НИСТ}=f(B)$, $\varepsilon_{НИСТ}=f(I_С)$.

## 4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Функциональная схема лабораторного макета.

4.3. Экспериментальные зависимости.

4.4. Сводная таблица.

4.5. Выводы.

## Контрольные вопросы

1.Физические принципы, законы, используемые для измерения величины и направления вектора магнитной индукции (напряженности магнитного поля).

2.Датчики Холла. Метрологические и конструктивные характеристики.

3.Магнитодиоды, магниторезисторы, магнитотранзисторы. Принципы работы, характеристики.

4. Индуктивные, индукционные датчики магнитных полей. Датчики Виганда. Датчики Джозефсона.

5.Применение датчиков магнитного поля в биомедицинских и технических системах.

## Библиографический список

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М.: Мир, 1992. 480 с.

2. Елизарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. М.: Радио и связь, 1987. 88 с.

3. Гуменюк С.В., Подлепецкий В.И. Интегральные полупроводниковые магниточувствительные датчики // Зарубежная электронная техника. 1989. Вып.12. С. 3-49.

4. Котенко Г.И. Магниторезисторы. Л.: Энергия, 1972. 81 с.

5. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.

6. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М: ДМК Пресс, 2001. – 544 с.

7. Егиазарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.

8. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.

5087

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 2

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 2 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы интегральных датчиков температуры, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 7. Библиогр.: 3 назв.

*Интегральный датчик температуры, преобразователь температура - напряжение, датчик температур на p-n-переходе*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы**

Исследование линейности и градуировка полупроводниковых датчиков температуры на основе биполярных транзисторов и ИМС КР1017ПП1.

## 1. Краткие теоретические сведения

Температурная зависимость напряжения на p-n-переходе (при фиксированном токе через него) обусловливает широкое применение полупроводниковых диодов и транзисторов в качестве датчиков температуры в электронных термометрах и других устройствах. Другими температурно-чувствительными параметрами p-n-перехода являются тепловой ток обратно смещенного перехода ($J_0$ или $J_{k0}$) и его дифференциальное сопротивление ($R_d$). Однако температурная зависимость прямого напряжения на переходе отличается меньшей нелинейностью. Чувствительность к температуре $S$ диода или транзистора, включённого по схеме диода (рис. 1), определяется как $S=dU/dT$ .Ее величина имеет порядок -2.5 мВ/°С, но она не является совершенно независимой от температуры. Кроме того, $S$, как и $U$, зависит от обратного тока $J_0$, который может быть разным у различных элементов. Поэтому взаимозаменяемость можно обеспечить только посредством отбора элементов, имеющих одинаковые определяющие параметры. Ток $I$ диода или транзистора в диодном включении связан с напряжением $U$ следующим соотношением:

$$I = I_0 \exp(qU/kT), \tag{1}$$

$$I_0 = CT^m \exp\left(-q\Delta E_g / kT\right), \tag{2}$$

где $\Delta E_g$ – ширина запрещенной зоны, В, равная для кремния 1,12 В; $m \approx 3$; С – константа, независящая от $T$, но зависящая от геометрии перехода и уровней легирования.

Тогда

$$U = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln I + \Delta E_g - m\left(\frac{kT}{q}\right)\ln(T) - \left(\frac{kT}{q}\right)\ln C. \tag{3}$$

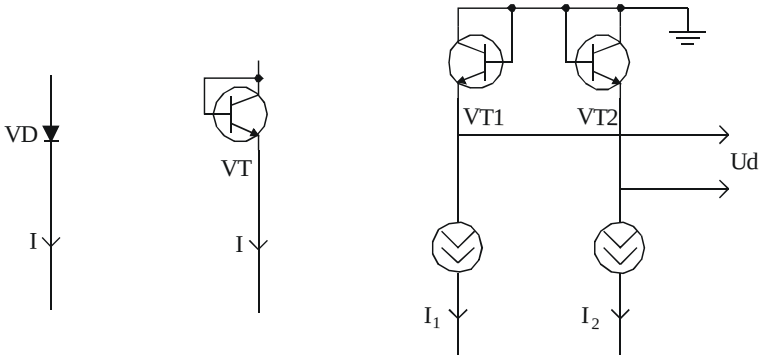
Константу $C$ и ток $I$ можно исключить, если известно напряжение $U_1$ при таком же токе $I$. При температуре $T_1$ имеем:

$$U = U_1\left(\frac{T}{T_1}\right) + \Delta E_g\left(1 - \frac{T}{T_1}\right) + m\left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{T_1}{T}\right), \qquad (4)$$

$$\frac{dU}{dT} = (U_1 - \Delta E_g)\left(\frac{1}{T_1}\right) - \left(\frac{mk}{q}\right)\left[1 + \ln\left(\frac{T}{T_1}\right)\right], \qquad (5)$$

$$\frac{dU}{dT} = -\frac{mk}{q} + (U - \Delta E_g)\left(\frac{1}{T}\right). \qquad (6)$$

Практическая схема преобразователя «температура-напряжение» (с датчиком на транзисторе), предназначенного для использования с цифровым вольтметром, показана на рис. 2.




а б в

Рис. 1. Варианты полупроводниковых датчиков температур на p-n-переходе: а – диод; б – эмиттерный переход; в – согласованная пара транзисторов

На операционном усилителе DA1 выполнен повторитель напряжения, DA2 – масштабирующий усилитель. Подстроечными резисторами R5 и R4 устанавливаются нулевое выходное напряжение, когда датчик находится при температуре $0^0$C, и выходное напряжение +0,5 В при температуре датчика $+50^0$C. При начальной установке большой крутизны резистором R4 можно значительно снизить

погрешности, связанные с разбросом параметров резисторов, используемых в схеме.

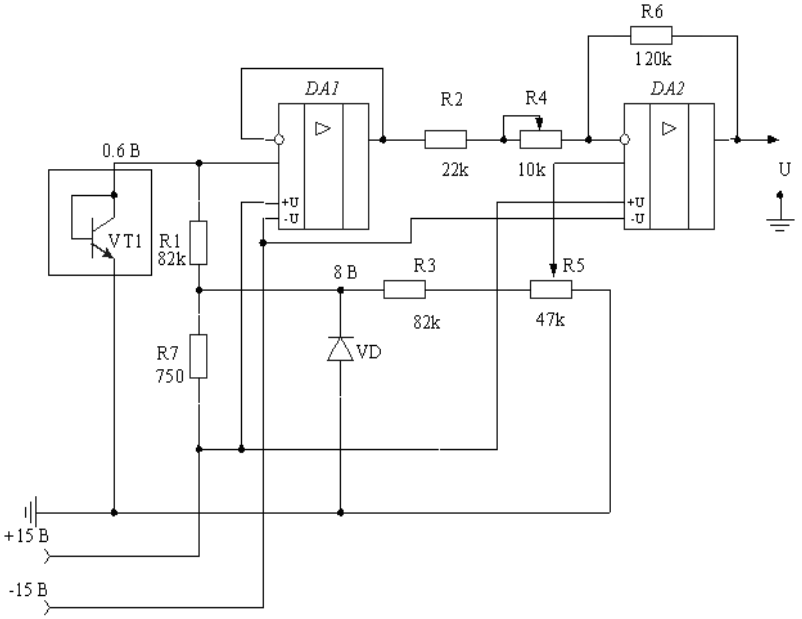



Рис. 2. Практическая схема преобразователя температура - напряжение

Значительное улучшение линейности и взаимозаменяемости достигается посредством использования спаренных транзисторов, включенных по схеме диода и питаемых постоянными токами $I_1$ и $I_2$, на которых изменяется разность напряжений между базой и эмиттером (рис.1, в). Это позволяет исключить влияние тока $I_0$ . Чувствительность такой схемы выражается формулой:

$$S = \frac{d(u_1 - u_2)}{dT}, \tag{7}$$

$$S = 86{,}66 \ln(I_1/I_2), \text{ мкВ}\cdot\text{К}^{-1}. \tag{8}$$

Это обычно больше чувствительности термопар, и для измерения не требуется знать температуру опорного спая. Но, тем не менее,

указанное значение ниже чувствительности термометров сопротивления с устройством формирования сигнала. Изменение электрических параметров при высоких и низких температурах определяет рабочий диапазон измеряемых температур, который охватывает температуры от -50 до +150˚С. В этом диапазоне датчики отличаются высокой стабильностью. Два транзистора *VT1* и *VT2* (рис.3, б) с одинаковыми значениями тока $I_0$ питаются параллельно постоянными токами $I_1$ и $I_2$. Для этой схемы справедливы соотношения:

$$I_1 = I_0 \exp\left(\frac{qU_1}{kT}\right) \quad \text{или} \quad U_1 = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right), \tag{9}$$

$$I_2 = I_0 \exp\left(\frac{qU_2}{kT}\right) \quad \text{или} \quad U_2 = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{I_2}{I_0}\right). \tag{10}$$

Измерение разности напряжений $U_d = U_1 - U_2$ позволяет исключить влияние $I_0$:

$$U_d = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \left(\frac{kT}{q}\right)\ln n, \tag{11}$$

где $n$ – отношение величин постоянных токов. С числовыми коэффициентами эта формула имеет следующий вид:

$$u_d = 86{,}56 \cdot T \lg n, \text{ где } [u_d] = \text{мкВ}, [T] = K. \tag{12}$$

Чувствительность к температуре выражается формулой:

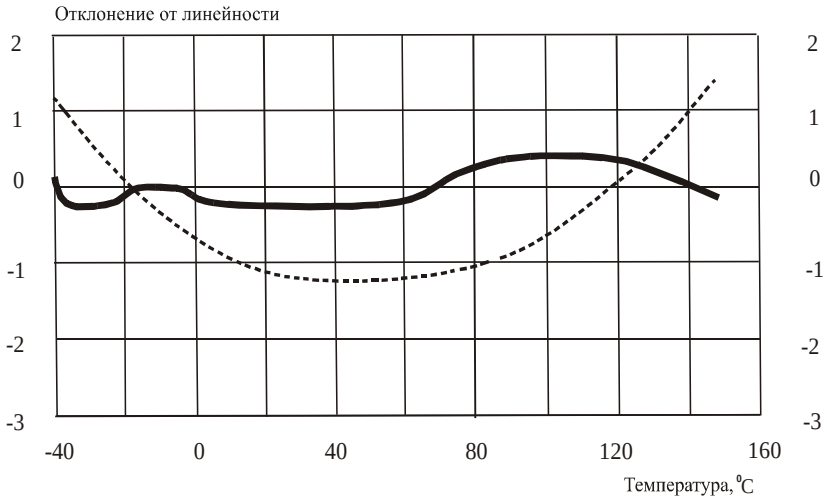
$$S = du/dT = \left(k/q\right)\lg n, \tag{13}$$

или численно: $S = 86{,}66 \cdot \lg(n)$, мкВ·К$^{-1}$. (14)

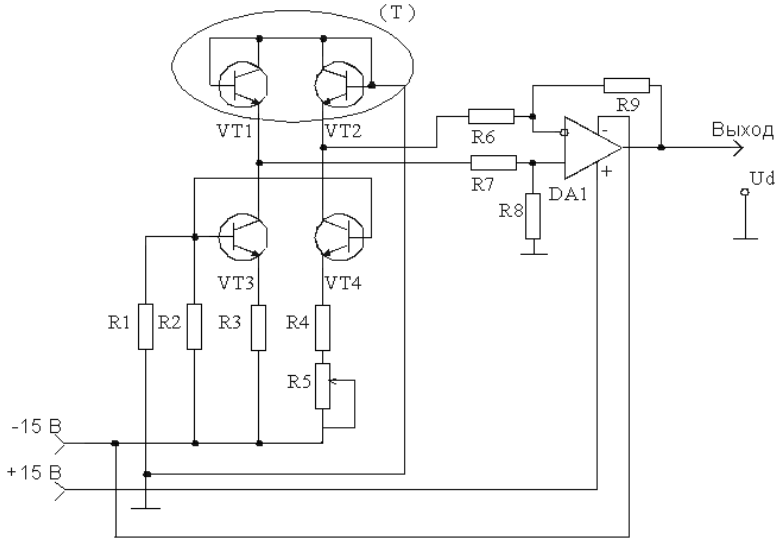
Чувствительность к температуре данной дифференциальной схемы меньше чувствительности схемы с одним диодом или транзистором, но она существенно меньше зависит от *T*. Линейность значительно улучшается, как это показано на рис. 3, а.

### *Интегральные датчики температуры*

Интегральные датчики температуры (ИТД) разрабатываются и выпускаются фирмами Analog Devices (AD580, AD590), National Semiconductor (LM135). Отечественной промышленностью был налажен выпуск ИТД серии 1017ПП1.




**а**




б

Рис. 3. Датчик температуры на спаренных транзисторах:
а – сравнение линейности (- - - - одиночный транзистор, —— - пара транзисторов); б – схема включения

### *Схемотехнические, параметрические и конструктивные особенности интегрального температурного датчика КР1017ПП1*

На рис. 4 представлена принципиальная схема ИТД КР1017ПП1, которая состоит из двух основных структурных единиц:

**I** – усилительный каскад, содержащий n-p-n транзисторы *VT4*, *VT6*, p-n-p транзисторы *VT3*, *VT5*;

**II** –термодатчик, включающий в себя n-p-n транзисторы *VT2* (многоэмиттерный), *VT7* и резистор *R2*.

Все элементы принципиальной схемы размещены на одной кристаллической подложке из кремния. Между резисторами *R2* и *R4* поддерживается соотношение:

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{kT_0 \lg A}{0{,}25E_g}, \qquad (15)$$

где $k$ – постоянная Больцмана, $T_0$ – абсолютная температура равенства токов $I_1$ и $I_2$, $E$g – ширина запрещенной зоны кремния, $A$ – отношение инжектирующих площадей транзисторов *VT2* и *VT7*.

Принцип работы ИТД КР1017ПП1 заключается в следующем. Для транзисторов n-p-n коэффициент усиления по току в схеме с ОЭ близок к 1, а для p-n-p транзисторов он заметно отличается от 1. Поэтому в дальнейшем базовыми токами в расчетах для n-p-n транзисторов (по сравнению с токами эмиттера) можно пренебречь. Тогда справедливы следующие соотношения:

$$I_1 = I_6 + I_7, \qquad (16)$$

$$I_2 = I_4 + I_5 = I_8, \qquad (17)$$

$$I_3 = I_6 + I_7 + I_8 = I_1 + I_2. \qquad (18)$$

Переходы эмиттер-база транзисторов *VT4* и *VT6* являются цепями отрицательной обратной связи для соответствующих транзисторов *VT2* и *VT7*. В свою очередь *VT2* и *VT7* работают при различных плотностях эмиттерного тока, различающихся в $A$ раз и выравнивающих значения токов $I_6$ и $I_7$. Поэтому:

$$I_6 = AI_7 \exp\left(-\frac{I_6 R_2}{\varphi_t}\right), \qquad (19)$$

где $\varphi_t = kT/q$ - тепловой потенциал. Если $I_6 = I_7$, то

$$I_6 = I_7 = \frac{\varphi_t \lg A}{R_2}. \qquad (20)$$

Напряжение на базе VT1 пропорционально разности токов $\gamma I_4 – I_5$; величина $\gamma < 1$ учитывает влияние отклонения коэффициентов передачи по току p-n-p транзисторов на передачу тока $I_5$. Следящий режим транзисторов *VT4*, *VT5* и *VT6* обеспечивается наличием ООС и ПОС усилителя II. ООС по базе *VT4* обеспечивается через резистор *R1*, ПОС по базе *VT6* – через *R3*.

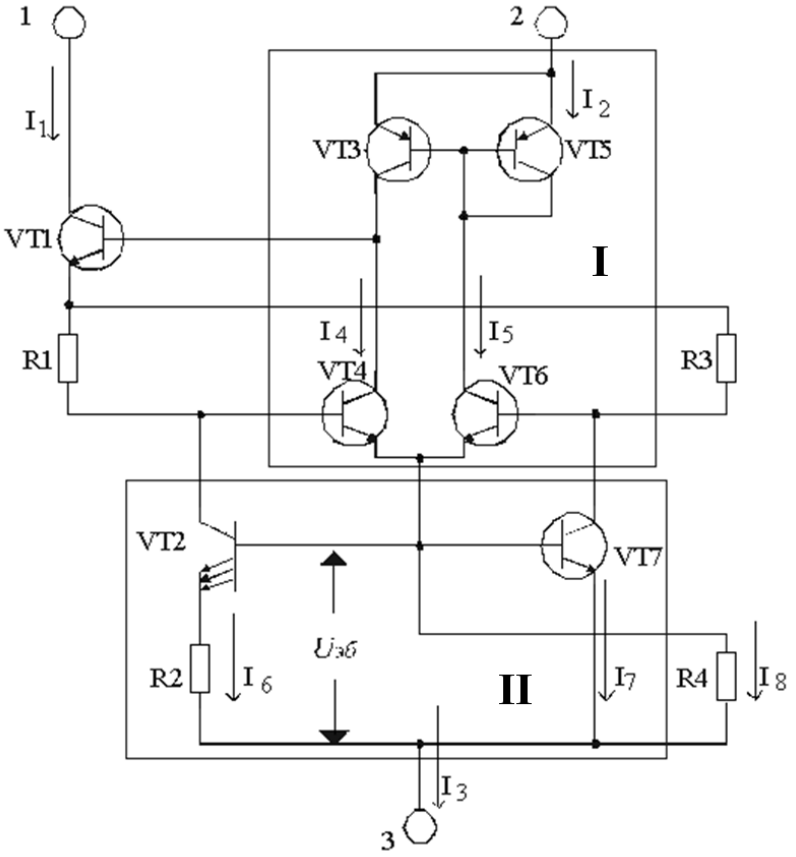



Рис. 4. Принципиальная схема ИТД КР1017ПП1

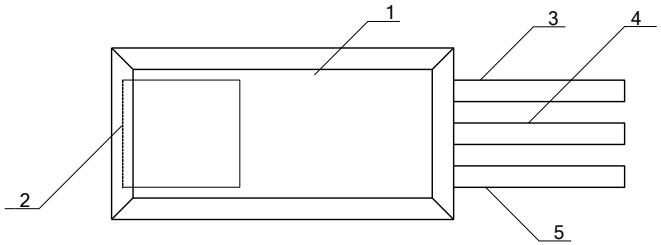



Рис. 5. Конструкция датчика КР1017ПП1:
1 – пластмассовая опрессовка; 2 – термоввод; 3 – вывод тока $I_1$;
4 – вывод тока $I_3$; 5 – вывод тока $I_2$

При условии *R1 = R3* усилитель **I** устойчив, так как глубина ПОС в γ раз меньше глубины ООС. В результате усилитель **I** обеспечивает для *VT1* такое рабочее смещение, при котором он суммирует протекающие через *R1* и *R3* токи $I_6$ и $I_7$ и на выводе 1 согласно (16) и (19):

$$I_1 = \frac{2\varphi_t \lg A}{R_2} = \frac{2k \lg A}{R_2} T \,, \qquad (21)$$

$$I_8 = \frac{U_{эб}}{R_4} \,. \qquad (22)$$

Температурный коэффициент тока $\boldsymbol{I_8}$:

$$\frac{dI_8}{dT} = \frac{U_{эб} - \dfrac{E_g}{q}}{TR_4} \,, \qquad (23)$$

$dI_8/dT < 0$, так как рабочее напряжение $Uэб \approx 0.6…0.7$ В, а $Eg/q$ для кремния равно 1,2 В. Этот факт позволяет установить условия стабильности тока $I_3$, когда $I_1$ и $I_8$ имеют противоположные по знаку температурные коэффициенты. Анализ нестабильности тока $I_3(\Delta I_3)$ при изменении температуры $\Delta T$ с погрешностью до величин второго порядка можно представить выражением:

$$\Delta I_3(\Delta T) = \frac{2kT_0 \lg A\Delta T}{qR_2T} + \frac{2kT_0 \lg A\Delta T^2}{qR_2T^2} + \frac{U_{эб} - \frac{E_g}{q}\Delta T}{R_4T} + \frac{U_{эб} - \frac{E_g}{q}\Delta T^2}{R_4T^2} + \cdots . \quad (24)$$

При условии

$$U_{эб}(T_0) = U_{эбо} = \frac{E_g}{2q}, \quad (25)$$

$$I_6(T_0) + I_7(T_0) = I_8(T_0). \quad (26)$$

Из (25) и (26) вытекает параметрическое соотношение (15). При этом ток $I_1$ является линейной функцией $T$ с положительным температурным коэффициентом, а ток $I_2 = I_3 - I_1$ – линейной функцией $T$ с таким же отрицательным температурным коэффициентом, причем при температуре $T_0$ $I_1 - I_2 = 0$. При подаче напряжения питания отрицательной полярности на вывод 3 и при съеме тока $I_1$ получаем преобразователь с абсолютной температурной шкалой, а при использовании разности токов $I_1$ и $I_2$ – со шкалой Цельсия. Другими словами, при использовании арифметических операций с токами $I_1$, $I_2$ и $I_3$ можно получить следующую характеристику ИТД:

$$\gamma_{(T)} = \frac{I_{1(T)} - I_{2(T)}}{I_{3(T)}} = \frac{t^0C}{173{,}2}\ ^\circ. \quad (27)$$

Конструкция датчика КР1017ПП1 представлена на рис. 5. Интегральная схема датчика выполнена на кристалле кремния 3 площадью 1,8×1,8 мм². Внешнее оформление датчика представляет собой пластмассовую опрессовку 4 в форме параллелепипеда размерами 8×3,6×2 мм. На задней торцевой плоскости расположены три коваровых вывода 6-8. На тыльной стороне датчика имеется коваровый термоввод 5 для ускорения передачи измеряемой температуры на кристалл. Типовая схема включения ИТД представлена на рис. 6.

**Метрологические характеристики ИТД КР1017ПП1**

| | |
|---|---|
| Напряжение питания | 9 В |
| Диапазон измеряемых температур | 0…+100 ºС |
| Нелинейность преобразования температуры: | |
| – в диапазоне 0…100 $^{o}$C | ≤ 0,5 ˚С |
| – в диапазоне 36…47 $^{o}$C | ≤ 0,05 ˚С |
| Разрешающая способность | не хуже 0,05 ˚С |
| Полоса пропускания в рабочем диапазоне температур | 0,02 Гц |

## 2. Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис. 7) состоит: из источника питания типа ВИП-010 (2-канальный); макета, где монтируются измерительная схема 1 (ИС-1) и измерительная схема 2 (ИС-2), для удобства в макете предусмотрен стабилизатор напряжения на 9 В для ИС-2. На макете расположены клеммы питания, выходные клеммы, тумблер переключения выходов ИС-1 и ИС-2, имеется выходное отверстие для датчиков температуры, цифрового вольтметра, термостата с опорным термометром. На рис. 7: ТДТ – транзисторный датчик температуры, ИТД – интегральный датчик температуры.

## 3. Порядок выполнения работы

3.1. Подключить источник питания к макету с измерительными схемами. Установить двухполярное питание ±15 В согласно рис. 7.

3.2. Подключить вольтметр к выходным клеммам макета.

3.3. Отградуировать транзисторный датчик температуры. Для этого установить тумблер в положение ТДТ, подстроечным резистором установить 0 В при 0 ˚С и 0,5 В при 50 ˚С.

3.4. Поместить датчики в термостат.

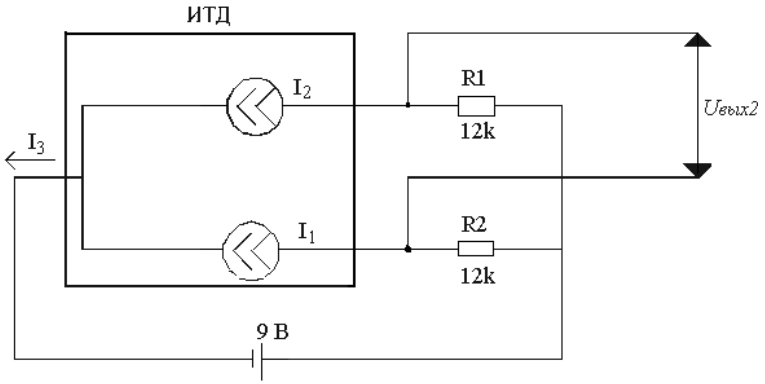



Рис. 6. Типовая схема включения КР1017ПП1

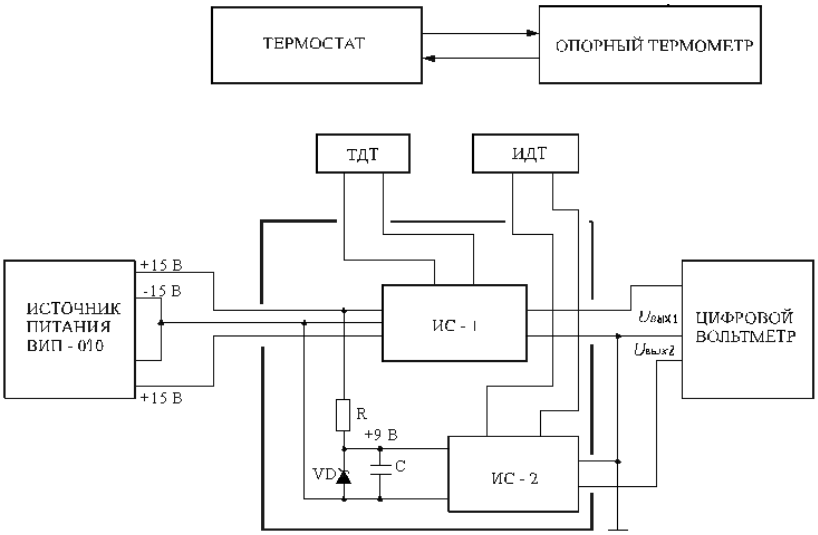



Рис. 7. Лабораторный стенд

3.5. Попеременно переключая тумблер, измерить выходные напряжения в диапазоне температур от 0 до 100 ˚С. Результаты измерения занести в таблицу.

| t, ˚C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Uвых1 ТДТ | | | | | | | | | | | |
| Uвых2 ИДТ | | | | | | | | | | | |

3.6. Построить зависимость Uвых(T) для обоих датчиков.

3.7. Оценить линейность характеристик.

## 4. Содержание отчета

4.1. Название и цель работы.

4.2. Функциональная схема лабораторного макета.

4.3. Градуировочные зависимости.

4.4. Расчет линейности и способы улучшения линейности.

4.5. Выводы.

## Контрольные вопросы и темы

1. Общая характеристика температурных датчиков.
2. Характеристика ДТ на основе биполярных транзисторов.
3. Интегральные датчики температуры.
4. Законы и физические принципы, используемые для измерения температуры.
5. Сравнение метрологических характеристик полупроводниковых и других классов температурных датчиков.

## Библиографический список

1. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: в 2-х кн.: пер. с франц. М: Мир, 1992. 480 с.

2. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.

3. Удалов Н.П. Полупроводниковые датчики Л.: Энергия, 1965. 240 с.

**5088**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

# СОВРЕМЕННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ

Методические указания
к лабораторной работе № 3

## ПОРОГОВЫЕ ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рязань 2016

УДК 621.384.001.63; 615.47:616-072.7

Современные твердотельные датчики: методические указания к лабораторной работе № 3 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Н.Б. Рыбин, Н.М. Толкач. Рязань, 2016. 12 с.

Содержат краткие теоретические сведения о конструкции и принципах работы пороговых датчиков температуры, а также материалы для выполнения лабораторной работы по дисциплине «Современные твердотельные датчики».

Предназначены для студентов дневного отделения направления 11.03.04.

Ил. 5. Библиогр.: 4 назв.

*Пороговый датчик температуры, S-диод, однопереходный транзистор, тиристор*

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники (зав. кафедрой Т.А. Холомина)

Современные твердотельные датчики

Составители: В и ш н я к о в Николай Владимирович
Г у д з е в Валерий Владимирович
Е р м а ч и х и н Александр Валерьевич
Р ы б и н Николай Борисович
Т о л к а ч Никита Михайлович

Редактор Н.А.Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.12.16. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,75.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

**Цель работы**

Ознакомление с принципами работы приборов с отрицательным сопротивлением, экспериментальные исследования зависимости их характеристик от температуры, освоение методики работы с приборами.

## 1. Краткие теоретическая часть

В основе работы пороговых датчиков температуры (переключателей) лежит эффект температурной зависимости параметров участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике. На этом участке с ростом напряжения ток уменьшается, т.е. положительному приращению напряжения соответствует отрицательное приращение тока и $R_д = dU/dT<0$ (рис. 1).

Как известно, отрицательное сопротивление возникает в цепи при наличии положительной обратной связи между входом и выходом. Этот закон справедлив и для полупроводниковых приборов. Однако отличаются они тем, что обратная связь в них внутренняя, т.е. создается процессами, протекающими внутри прибора, а не передачей сигнала с выхода на вход по внешней цепи.

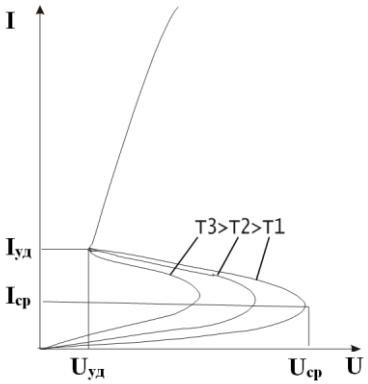



Рис.1. ВАХ термистора

### *S-диод*

У простых диодов считается, что всё внешнее напряжение падает на *p-n*-переходе. Падение напряжения на омическом сопротивлении

базовой области сравнительно мало и принимается равным нулю. Однако в “длинных“ диодах, в которых толщина базовой области больше длины диффузионного смещения носителей зарядов $W>L_{p,n}$ (на основе высокоомных полупроводников), падением напряжения на базе пренебрегать нельзя.

В этом случае приложенное к диоду напряжение $U$ распределяется между областью объёмного заряда $p$-$n$-перехода и базой (на примере $p^+$-$n$-$n^+$ структуры, рис. 2):

$$U=U_0+U_б. \quad (1)$$

Физический механизм возникновения отрицательного сопротивления заключается в перераспределении внешнего напряжения между $p$-$n$-переходом и базой. С увеличением тока через диод растет инжекция носителей заряда в базу и уменьшается её сопротивление. По этой причине внешнее напряжение, приложенное к диоду, перераспределяется, а именно: часть напряжения, падающая на базе, уменьшается, а часть, падающая на $p$-$n$-переходе, увеличивается. Увеличение напряжения на $p$-$n$-переходе приводит к увеличению концентрации инжектированных носителей в базе диода, к дальнейшему уменьшению сопротивления базы, перераспределению напряжения и т.д. Это и есть положительная обратная связь, необходимая для появления отрицательного сопротивления. Однако сопротивление $p$-$n$-перехода с ростом тока также уменьшается, поэтому такой процесс возможен только в том случае, если сопротивление базы сильнее уменьшается с ростом тока, чем сопротивление $p$-$n$-перехода. Для этого необходимо, чтобы проводимость базы увеличивалась не только за счет инжекции, но и за счет какого-то дополнительного механизма. К основным дополнительным механизмам относят увеличение времени жизни или подвижности инжектированных носителей в компенсированном проводнике, возрастание биполярной подвижности (скорости и направления движения неравновесных носителей в электрическом поле), изменение коэффициента инжекции $p$-$n$-перехода. Однако в данной ситуации наибольший интерес представляет собой тепловой

механизм образования отрицательного сопротивления. При протекании тока через диод в нём выделяется тепло. Это также может быть причиной усиления положительной обратной связи и образования отрицательного сопротивления. Разогрев базы приводит к увеличению концентрации носителей заряда в ней. Сопротивление базы уменьшается. Происходит перераспределение напряжения между *p*-*n*-переходом и базой в сторону увеличения напряжения на p-n-переходе. Вследствие этого увеличивается инжекция носителей заряда через *p*-*n*-переход, сопротивление базы уменьшается ещё больше, что ведёт к дальнейшему перераспределению напряжения и т.д. Следует также иметь в виду, что разогрев базы зависит от температуры внешней среды. Кроме того, с ростом температуры меняются подвижности носителей заряда, отношение подвижностей и время их жизни. Очевидно, соответствующие изменения этих величин в зависимости от температуры могут также приводить к образованию участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике диода.

### *Однопереходный транзистор*

Однопереходный транзистор, часто называемый также двухбазовым диодом, состоит из стержня полупроводника с омическими контактами на концах и *p*-*n*-переходом между ними. В однопереходном транзисторе *p*-*n*-переход, выполняемый на боковой поверхности, занимает меньшую часть и включается в прямом направлении (рис. 3).

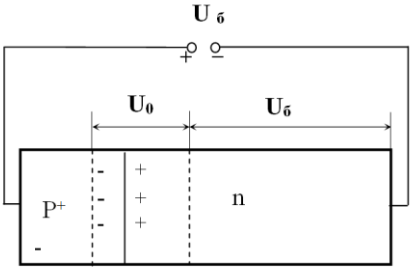
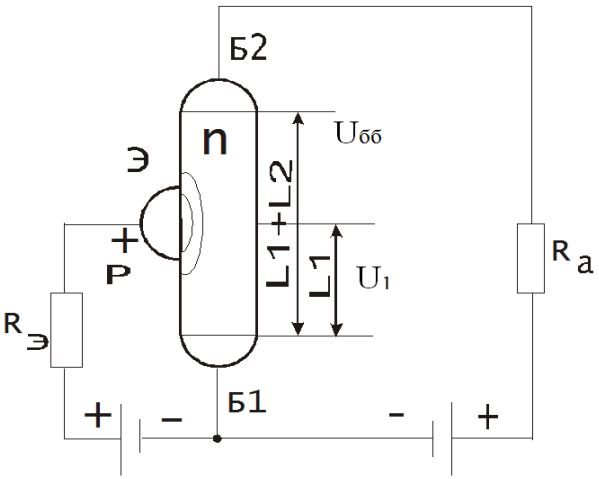
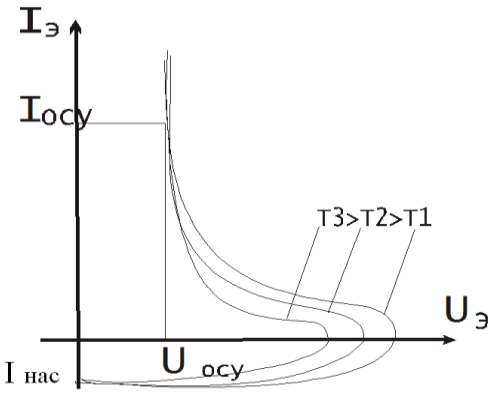



Рис. 2. Структурная схема диода




а




б

Рис. 3. Функциональная схема (а) и ВАХ (б) однопереходного транзистора

Пусть к базам однопереходного транзистора приложено напряжение $U_{бб}$. Для простоты будем считать эмиттер точечным, тогда падение напряжения на нижней части базы длиной $l_1$ равно

$U_1=U_{бб}l_1/(l_1+l_2)$. Напряжение на *p-n* переходе $U_{p-n}=U_э + U_1$ . При увеличении $U_э$ в интервале $0<U_э<U_1$, $U_{p-n}<0$ и через *p-n*-переход протекает малый обратный ток $I_{нас}$. При $U_э=U_1$ напряжение на *p-n*-переходе равно нулю, однако это состояние равновесия является неустойчивым. Вследствие различных флюктуаций, например тепловых, сопротивление нижней части базы может оказаться немного меньше своего стационарного значения. Напряжение $U_1$ при этом также уменьшится, что приведет к тому, что $U_э>U_1$, эмиттерный переход окажется смещенным в прямом направлении и будет инжектировать в базу дырки.

Под действием электрического поля в базе, создаваемого напряжением $U_{бб}$, инжектированные дырки уносятся в нижнюю часть базы, вследствие чего её сопротивление ещё больше уменьшается. Уменьшение сопротивления нижней части базы приводит к дальнейшему уменьшению напряжения $U_1$ и увеличению $U_{p-n}$, вследствие чего инжекция носителей и ток через *p-n*-переход продолжают расти. Такой самоускоряющийся процесс приводит к лавинному нарастанию тока через *p-n*-переход и к уменьшению падения напряжения на последовательно включенных сопротивлениях *p-n*-перехода и нижней части базы. Таким образом, входная характеристика одноперехода относится к S-типу. Ее существенным отличием от аналогичных характеристик других приборов является то, что включение происходит при практически нулевых токах эмиттера.

### *Тиристоры*

Тиристорами называются полупроводниковые приборы с тремя (и более) *p-n*-переходами, предназначенными для использования в качестве электронных ключей в схемах переключения электрических токов.

Простейшие диодные тиристоры, запираемые в обратном направлении, обычно изготавливаются из кремния и содержат четыре чередующихся *p*- и *n*-области (рис. 4, а). Область $p_1$, в которую попадает ток из внешней цепи, называют анодом, область $n_2$ –

катодом; области $n_1$ ,$p_2$ – базами. Если к аноду $p_1$ подключить плюс источника напряжения, а к катоду $n_2$ – минус, то переходы $p_1$-$n_1$ и $p_2$-$n_2$ окажутся открытыми, а переход $n_1$-$p_2$ – закрытым. Его называют коллекторным переходом.

Так как коллекторный $p$-$n$-переход смещен в обратном направлении, то до определённого значения почти всё приложенное напряжение падает на нём. Такая структура легко может быть представлена в виде двух транзисторов разной электропроводности, соединённых между собой так, как показано на рис. 4, б. Ток цепи определяется током коллекторного перехода $n_1$-$p_2$. Он однозначно зависит от потока дырок из эмиттера транзистора $p$-$n$-$p$ типа и потока электронов из эмиттера транзистора $n$-$p$-$n$ типа, а также от обратного тока $p$-$n$-перехода. Так как переходы $p_1$-$n_1$ и $p_2$-$n_2$ смещены в прямом направлении, из них в области баз инжектируются носители заряда: дырки – из области $p_1$, электроны – из области $n_2$. Эти носители заряда, диффундируя в областях баз $n_1$, $p_2$, приближаются к коллекторному переходу и его полем перебрасываются через $p$-$n$-переход. Дырки, инжектированные из области $p_1$, и электроны из $n_2$ движутся через переход $n_1$-$p_2$ в противоположных направлениях, создавая общий ток $I$. При малых значениях внешнего напряжения практически всё оно падает на коллекторном переходе $n_1$-$p_2$. Поэтому к переходам $p_1$-$n_1$, $p_2$-$n_2$, имеющим малое сопротивление, приложена малая разность потенциалов, и инжекция носителей зарядов невелика. В этом случае ток $I$ мал и равен обратному току через переход $n_1$-$p_2$, т.е. $I_{к0}$. При увеличении внешнего напряжения ток в цепи сначала меняется незначительно. При дальнейшем возрастании напряжения, по мере увеличения ширины перехода $n_1$-$p_2$, всё большую роль начинают играть носители заряда, образовавшиеся вследствие ударной ионизации. При определенном напряжении носители заряда ускоряются настолько, что при столкновении с атомами в области $p$-$n$-перехода ионизируют их, вызывая лавинное размножение носителей заряда. Образовавшиеся при этом дырки под влиянием электрического поля переходят в область $p_2$, а электроны – в область $n_1$. Ток через

переход $n_1$-$p_2$ увеличивается, а его сопротивление и падение напряжения на нем уменьшаются. Это приводит к повышению напряжения, приложенного к переходам $p_1$-$n_1$, $p_2$-$n_2$, и увеличению инжекции через них, что вызывает дальнейший рост коллекторного тока и увеличение токов инжекции. Процесс протекает лавинообразно и сопротивление перехода $n_1$-$p_2$ становится малым.

Носители заряда, появившиеся в областях вследствие инжекции и лавинного размножения, приводят к уменьшению сопротивления всех областей тиристора, и падение напряжения на приборе становится незначительным. На вольт-амперной характеристике этому процессу соответствует участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. После переключения вольт-амперная характеристика аналогична ветви характеристики диода, смещенного в прямом направлении. Начальный участок ВАХ соответствует закрытому состоянию тиристора.

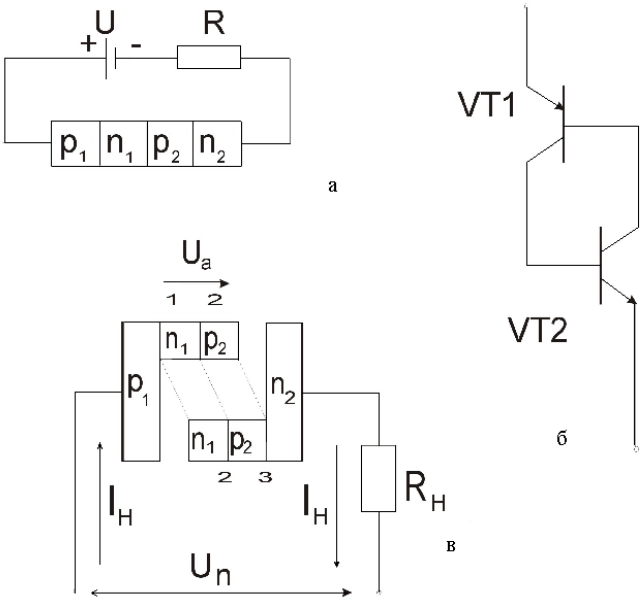



Рис. 4. Структура тиристора

Триодные тиристоры отличаются от диодных тем, что одна из баз имеет внешний вывод, который называют управляющим электродом. При подаче в цепь управляющего электрода тока управления $I_y$ ток через $p_2$-$n_2$-переход увеличивается. Дополнительная инжекция носителей заряда через $p$-$n$-переход приводит к увеличению тока $I_к$. Увеличение тока через закрытый коллекторный $p$-$n$-переход в первом приближении аналогично увеличению приложенного напряжения, так как в обоих случаях увеличивается вероятность лавинного размножения носителей заряда. Поэтому, изменяя ток, можно менять напряжение, при котором происходит переключение тиристора, и, тем самым, управлять моментом его включения.

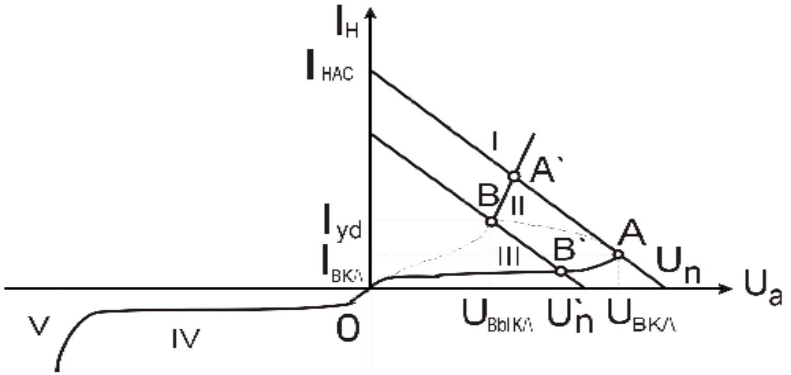



Рис. 5. ВАХ тиристора

Наибольший интерес с точки зрения применения полупроводниковых приборов в качестве пороговых датчиков температуры представляет зависимость напряжения включения $U_{ср}$ от температуры. Таким датчиком может быть любой прибор с участком отрицательного сопротивления на вольт-амперной характеристике. С точки зрения применения разница между этими приборами несущественна. Поэтому достаточно рассмотреть более подробно

работу тиристоров как датчиков температуры. Напряжение включения у них определяется формулой:

$$U_{СР} = U_{КБПРОБ} \cdot \sqrt{1 - h_{21Б} - \left( \mathrm{A} \cdot \frac{\partial h_{21Б}}{\partial I} \right)^{1/2}}, \qquad (2)$$

где $A=I_{КБО}+h_{21Б2}\, I_{У}$.

При $I_{У}=0$ основными зависящими от температуры величинами в этой формуле являются $U_{КБПРОБ}$ и $I_{КБО}$. В настоящее время выпускаются в основном кремниевые тиристоры. Напряжение лавинного пробоя кремниевых *p*-*n*-переходов слабо увеличивается с ростом температуры (порядка 0.3 %/град) за счет уменьшения длины свободного пробега носителей заряда.

Однако в кремниевых *p*-*n*-переходах мало как абсолютное значение $I_{КБО}$, так и его относительное изменение с ростом температуры. Таким образом , небольшое увеличение $U_{СР}$ за счет роста с температурой $U_{ПРОБ}$ компенсируется уменьшением $U_{СР}$ за счет увеличения $I_{КБО}$. Соответственно напряжение включения не меняется с температурой до высоких температур (120 $^{0}$C), когда $I_{КБО}$ становится достаточно большим (см. рис. 5). В германиевых *p*-*n*-переходах $I_{КБО}$ значительно больше, и его увеличение с температурой должно приводить к заметному уменьшению напряжения включения. Кроме того, напряжение пробоя германиевых *p*-*n*-переходов с ростом температуры уменьшается, что обусловливает дополнительное уменьшение $U_{СР}$. Эксперименты с германиевыми тиристорами показали, что напряжение включения линейно уменьшается (0,5 В/град) с ростом температуры до 30...35, после чего уменьшение становится сверхлинейным.

Следует отметить, что на основе пороговых датчиков могут быть построены реле, реагирующие на изменение не только температуры, но и влажности, скорости потока, уровня жидкости и т.д., так как при повышении температуры окружающей среды или при уменьшении коэффициента рассеяния (при помещении датчика в среду с меньшей теплопроводностью, а также при снижении скорости потока

окружающего воздуха или другой среды) уменьшается напряжение срыва датчиков, что легко фиксируется релейными элементами.

## 2. Порядок выполнения работы

2.1. Изучите измерительный прибор Л2–56 и включите его тумблером “Сеть”, при этом должна загореться сигнальная лампа.

2.2. Тиристор, характеристика которого измеряется, установлен в печь, а выводы провода прикреплены к клеммам колодки. Эту колодку необходимо установить в блоке испытаний прибора Л2–56 и закрыть защитной крышкой.

2.3. На экране прибора расположите луч в левом нижнем углу соответствующими ручками. Причем переключатели Л2–56 должны быть установлены так:

| | |
|---|---|
| режим | норм. |
| максимальное пиковое напряжение | 80 В |
| полярность | ~ |
| предел тока | 20 мА |
| количество ступенек | 1 |
| регулировка напряжения | до упора против часовой стрелки |
| калиброванное перемещение (смещение) | 0 |

2.4. Для получения ВАХ тиристора, пользуясь справочными данными, задайте необходимый масштаб с помощью переключателей "Горизонталь" и "Вертикаль". Управляя ручками "Регулировка напряжения" и "Амплитуда ступенек", добейтесь чёткого изображения S-образной характеристики. Зарисуйте эту характеристику и зафиксируйте значения напряжения срыва при комнатной температуре.

2.5. Переключателями смещения изображения по горизонтали и вертикали точку срыва характеристики поместите в левый нижний

угол экрана. Увеличивайте масштаб по горизонтали до той поры, пока точка срыва из левого угла не переместится в правый.

2.6. Включите в работу печь и нагревайте тиристор, следя за ходом изменения напряжения срыва. Проводите измерения напряжения срыва через каждые 10 $^0$C до температуры 140 $^0$C. Результаты измерений занесите в таблицу и постройте график экспериментальной зависимости.

| Температура, $^0$C | 20 | 30 | ... | ... | ... | 140 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_{CP}$ , В | | | | | | |

2.7. Аналогично измерьте температурную зависимость $U_{CP}$ для S-диода и одноперехoдного транзистора.

### 3. Содержание отчета

3.1. Название и цель работы.

3.2. Функциональная схема лабораторного макета.

3.3. Экспериментальные таблицы, зависимости.

3.4. Расчет чувствительности.

3.5. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Вольт-амперные характеристики S-типа и N-типа.
2. S-диод, его ВАХ, зависимость характеристик от температуры, физический механизм возникновения отрицательного сопротивления.
3. Одноперехoдный транзистор, его схемы включения и ВАХ.
4. Тиристор, его структура и принцип действия.
5. ВАХ тиристора, зависимость напряжения включения от температуры.
6. Практическое применение пороговых датчиков температуры.

**Библиографический список**

1. Виглеб Г. Датчики: пер. с нем. М.: Мир, 1989. 196 с.

2. Осипович Л.А Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979. 159 с.

3. Удалов И.П. Полупроводниковые датчики. Л.: Энергия, 1965. 240 с.

4. Викулин И.М, Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.



Оператор ЭДО ООО "Компания "Тензор"

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

СОГЛАСОВАНО **ФГБОУ ВО "РГРТУ", РГРТУ,** Литвинов Владимир Георгиевич, Заведующий кафедрой МНЭЛ **14.07.25** 13:44 (MSK) Простая подпись